

شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند نیرو - تغییر مکان جانبی در جداسازهای الیافی با در نظر گرفتن اثر مولینز

علی منظوری^۱، حمید توپچی نژاد^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه رازی کرمانشاه

* h.toopchinezhad@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۷/۱۱]

چکیده- در این مقاله جداسازهای لرزه‌ای الاستومری مسلح به الیاف (با به اختصار جداسازهای الیافی) معرفی شده‌اند. با توجه به شرایط مرزی در سطوح تماس، جداسازهای الیافی در دو کاربری متصل (سطوح تماس دارای اتصال مکانیکی با تکیه‌گاه‌های جداساز) و غیر متصل (سطوح تماس بدون اتصال مکانیکی با تکیه‌گاه‌های جداساز) قابل استفاده است. هدف اصلی این مقاله شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی جانبی جداسازهای الیافی غیر متصل است. شاخصه اصلی در رفتار جانبی جداسازهای یاد شده وجود سخت‌شدگی ثانویه پس از نرم‌شدگی تدریجی اولیه جداساز است. با توجه به اثر مولینز، مشخصات مکانیکی جداساز در سیکل‌های اول جابه‌جایی‌های هم‌دامنه متفاوت از سایر سیکل‌های جابه‌جایی است. از این‌رو نسخه اصلاح شده‌ای از مدل بوک-ون برای شبیه‌سازی رفتار جانبی جداسازهای مورد نظر با توجه به ویژگی رفتاری خاص آنها ارائه شده است. مقایسه حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی و حلقه‌های شبیه‌سازی شده نشانگر دقت مناسب نسخه ارائه شده مدل بوک-ون در شبیه‌سازی رفتار تاریخیچه زمانی نیرو- تغییر مکان جانبی جداسازهای لرزه‌ای مورد نظر است.

واژگان کلیدی: جداسازهای الاستومری مسلح به الیاف، جداسازهای الیافی غیرمتصل، اثر مولینز، مدل بوک-ون، تحلیل تاریخیچه زمانی

۱- مقدمه

آنها به لایه‌های الاستومر با اعمال فشار و تحت درجه حرارت بالا را شامل می‌شود. علاوه بر آن، وزن زیاد جداسازها که ناشی از کاربرد صفحات تسلیم فولادی می‌باشد، در افزایش هزینه‌های بارگیری، حمل و نقل و نصب آنها موثر است.

به منظور گسترش کاربرد جداسازی لرزه‌ای در ساختمان‌های معمولی (اعم از مسکونی و تجاری) لازم است که قیمت تمام شده و همچنین وزن جداسازها کاهش پیدا کند. در این راستا گونه جدیدی از جداسازهای الاستومری در سالیان گذشته مطرح شده‌اند که در آنها لایه‌های تسلیم الیافی - دارای مدول کششی بالا و قابل قیاس با فولاد- جایگزین صفحات تسلیم فولادی می‌شوند [۲]. این نوع جداسازها در این مقاله به اختصار جداسازهای الیافی نامیده

جداسازی لرزه‌ای روش بسیار موثری در کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها هنگام زلزله است. با این وجود گستره کاربرد این فناوری محدود بوده و بیشتر در برخی از سازه‌های مهم به کار گرفته شده است. هزینه‌های قابل توجه طراحی، ساخت و نصب از جمله موانع مهم استفاده وسیع از این فناوری در سازه‌های مختلف است [۱].

یکی از متداول‌ترین انواع جداسازها، جداسازهای الاستومری مسلح به صفحات فولادی است که به دلیل قیمت بسیار گران، کاربرد آنها در ساختمان‌های معمولی غالباً بدون توجه اقتصادی است. قیمت گران عمدتاً به دلیل هزینه‌های بالای تولید جداساز است که مراحلی مانند ساخت قالب، آماده‌سازی صفحات تسلیم فولادی و اتصال

کرنش‌های رفت و برگشتی هم دامنه‌ی کششی، فشاری، و یا برشی، خواص مکانیکی الاستومر مانند مقاومت، سختی، و قابلیت استهلاک انرژی نسبت به سیکل اول بارگذاری آن کاهش محسوسی یافته و پس از تجربه چند سیکل به مقادیر ثابتی می‌رسند [۷]. این پدیده به نام کاشف آن اثر مولینز^۵ نام‌گذاری شده است. در نظرگرفتن اثر مولینز در تحلیل تاریخچه زمانی لرزه‌ای جداسازهای الاستومری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چرا که معمولاً مقادیر پیشینه بازتاب جداساز مربوط به حلقه‌های پسماند کرنش ندیده^۶ مانند پاسخ نامانای^۷ آن است. با وجود این اهمیت، در بین مدل‌های تحلیلی موجود در ادبیات پژوهش کمتر مدلی را می‌توان جستجو کرد که اثر مولینز را صریحاً در شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند جداسازهای الاستومری ملحوظ نماید.

در این مقاله ضمن مرور اجمالی ویژگی‌های رفتاری جداسازهای الیافی، مدلی تحلیلی برای شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی نیرو- تغییر مکان جانبی گونه‌ای خاص از جداسازهای الیافی ارائه شده است. مدل یاد شده ضمن لحاظ نرخ بارگذاری، اثر مولینز را نیز، به عنوان یک کار بدیع، در شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند جداساز تحت اثر جابه‌جایی‌های رفت و برگشتی با تابع سینوسی در نظر می‌گیرد.

۲- جداسازهای لرزه‌ای الاستومری مسلح به الیاف

جداسازهای الاستومری مسلح به الیاف (جداسازهای الیافی) از لایه‌های الاستومر و تسلیح الیافی که بطور متناوب به یکدیگر چسبانده و با هم پیوسته شده‌اند ساخته می‌شوند [۱، ۲، ۸، ۹]. نوع الاستومر مصرفی می‌تواند مشابه مواد مصرفی در جداسازهای الاستومری متعارف باشد. تسلیح الیافی نیز معمولاً به شکل پارچه-

می‌شوند. بدیهی است در نتیجه کاربرد لایه‌های تسلیح الیافی، وزن جداساز در مقایسه با جداسازهای متداول کاهش قابل توجهی یافته و چنانچه فرایند ارزانتتری در تولید جداسازهای یاد شده به کار گرفته شود؛ امکان کاهش قیمت تمام شده جداساز در حدی که استفاده از آن در ساختمان‌های معمولی توجیه پذیر باشد نیز وجود خواهد داشت. در طی یک و نیم دهه گذشته مطالعات جامعی در زمینه بررسی رفتار جداسازهای الاستومری مسلح به الیاف (جداسازهای الیافی) صورت پذیرفته است. نتیجه مشترک این مطالعات آن است که رفتار جداسازهای الیافی قابل مقایسه با جداسازهای الاستومری متعارف بوده و می‌توان آن‌ها را به عنوان نسل جدید جداسازهای الاستومری در لرزه جداسازی بسیاری از سازه‌ها به کار گرفت [۳].

علاوه بر کاهش قیمت تمام شده جداساز، عامل دیگری که در توسعه کاربرد آن موثر است در اختیار داشتن ابزار تحلیلی ساده و مناسب در پیش بینی رفتار دینامیکی جداساز به هنگام زلزله است. برای این منظور لازم است در گام اول، حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی نیرو- جابه‌جایی جانبی جداسازها به کمک یک مدل تحلیلی مناسب شبیه سازی شود.

جداسازهای الیافی مانند سایر جداسازهای الاستومری دیگر از لاستیک به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک^۱ ساخته شده‌اند. در مواد ویسکوالاستیک تنش‌های ایجاد شده در ماده علاوه بر میزان کرنش، تابع نرخ^۲ تغییرات کرنش نیز است. در ادبیات پژوهش مدل‌های متنوعی را می‌توان جستجو نمود که در شبیه سازی حلقه‌های پسماند جداسازهای الاستومری نرخ جابه‌جایی‌های وارد شده بر جداساز را نیز لحاظ می‌کند (برای نمونه [۴، ۵، ۶]). پدیده دیگری که از خواص ذاتی مواد الاستومری تحت اثر کرنش‌های رفت و برگشتی^۳ هم دامنه محسوب می‌شود، پدیده کرنش دیدگی^۴ الاستومر در سیکل‌های بعدی و پس از تجربه اولین سیکل بارگذاری است. تحت اثر هر یک از

^۱ viscoelastic

^۲ rate

^۳ cyclic

^۴ scragging

^۵ Mullins' effect

^۶ unscragged

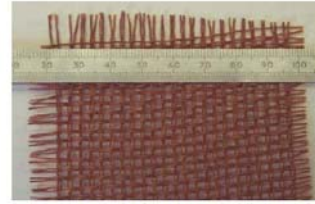
^۷ transient response

متصل را اجتناب ناپذیر می‌نماید. بنابراین، قیمت تمام شده جداسازهای یاد شده همچنان کاربری اقتصادی آنها در ساختمان‌های معمولی را می‌تواند تحت الشعاع قرار دهد.

۲-۲- جداسازهای الیافی غیر متصل

در حالت کاربری غیرمتصل، جداساز الیافی بدون هیچ‌گونه اتصال مکانیکی در سطوح تماس، بین روسازه و زیرسازه قرار گرفته و در هنگام زلزله نیروهای برشی از طریق اصطکاک بین سطوح تماس جداگر و تکیه‌گاه‌های آن منتقل می‌شوند. بنابراین، در این گونه جداسازهای الیافی نیازی به تعیبه صفحات فولادی ضخیم در دو انتهای جداساز نبوده که این امر می‌تواند ضمن سبک‌تر کردن جداساز موجب اقتصادی‌تر شدن تولید آن، با حذف قالب و در صورت به کار بستن روش‌های تولید انبوه، شود [۱]، [۲]. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهند که کاربری غیرمتصل یک جداساز الیافی در عین حال می‌تواند موجب افزایش قابل توجه کارایی آن به عنوان یک لرزه جداساز شود. هنگامی که جداساز الیافی غیر متصل دچار تغییر مکان جانبی می‌شود، بخشی از وجوه بالایی و پایینی آن از سطوح تکیه‌گاه جدا شده و اصطلاحاً جداساز تغییر شکل جانبی شبه غلتان^{۱۱} می‌دهد [۹]. مراحل مختلف تغییر شکل شبه غلتان یک جداساز الیافی غیرمتصل که به دلیل شرایط مرزی غیر متصل جداساز و همچنین عدم وجود سختی خمشی در لایه‌های تسلیح الیافی آن بوجود می‌آید را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد. تغییر شکل شبه غلتان، به عنوان یک پدیده مثبت- حتی اگر جداساز از لاستیک پر نشده که ذاتاً دارای میرایی کمی بوده و معمولاً رفتار تنش کرنش آن خطی است ساخته شده باشد، سبب کاهش سختی جانبی موثر جداساز با افزایش تغییر مکان جانبی آن می‌شود (شکل ۳)؛ که در نتیجه این امر دوره تناوب جداساز افزایش بیشتری یافته و کارایی آن به عنوان یک جداساز لرزه‌ای ارتقا می‌یابد [۹]. با توجه به شکل ۳، رفتار غیرخطی جداساز غیرمتصل در قیاس با جداساز الیافی متصل به معنای انتقال نیروی برشی کمتر به روسازه (یعنی

ی^۸ بافته شده از رشته‌های الیاف در دو امتداد عمود بر هم می‌باشد. شکل ۱ نمونه الیاف شیشه و کربن استفاده شده در جداسازهای الیافی را نشان می‌دهد.



الف) الیاف شیشه در دو جهت



ب) الیاف کربن در دو جهت

شکل (۱) نمونه الیاف قابل استفاده در جداسازهای الیافی [۱۰]

جداسازهای الیافی با توجه به نوع کاربری و چگونگی اتصال به سطوح تکیه‌گاهی بالا و پایین خود به دو دسته متصل^۹ و غیرمتصل^{۱۰} دسته بندی می‌شوند [۳].

۲-۱- جداسازهای الیافی متصل

در جداسازهای متصل، دو صفحه فولادی ضخیم به سطوح بالایی و پایینی جداساز متصل (پیوسته) می‌شوند. در هنگام نصب جداساز این صفحات فولادی ضخیم به سطوح تکیه‌گاهی بالایی و پایینی جداساز (روسازه و زیرسازه) به وسیله‌ی پیچ و مهره متصل می‌شوند. براساس مطالعات انجام شده، رفتار نیرو- جابه‌جایی جداسازهای الیافی متصل عموماً قابل مقایسه با جداسازهای الاستومری متعارف- که به صفحات فولادی مسلح هستند- است [۸]، [۱۱]. جایگزینی لایه‌های تسلیح الیافی با صفحات تسلیح فولادی میانی اگرچه موجب کاهش قابل توجه وزن جداساز می‌شود؛ لیکن وجود صفحات فولادی ضخیم انتهایی استفاده از قالب در ساخت جداسازهای الیافی

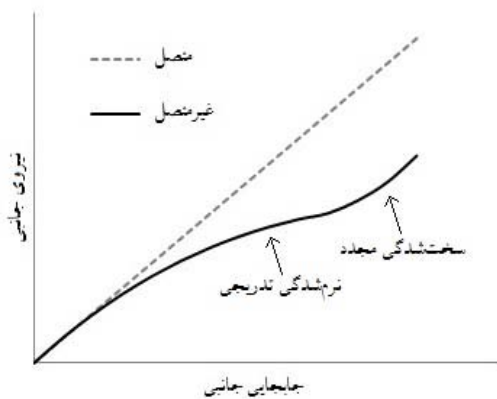
^۸ fabric

^۹ bounded

^{۱۰} unbounded

^{۱۱} rollover deformation

و کاهش قیمت تمام شده جداساز می‌شود [۳]. نکته دیگری که در رفتار جداسازهای الیافی غیرمتصل به اثبات رسیده قابلیت جذب انرژی (میرایی) جداساز است که به واسطه اندرکنش داخلی بین لایه‌های الاستومر و تسلیح الیافی تامین شده و مضاف بر میرایی ذاتی الاستومر است [۱۴]. با توجه به آنچه که طرح شد، به نظر می‌رسد جداسازهای الیافی غیرمتصل بالقوه قابلیت کاربرد اقتصادی در لرزه جداسازی ساختمان‌های معمولی را داشته باشند.

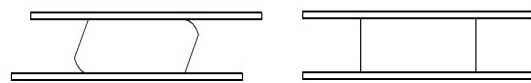


شکل (۳) نمودار نیرو- جابه‌جایی جانبی در جداسازهای الیافی متصل و غیرمتصل ساخته شده از لاستیک پرنشده

۳- رفتار جانبی جداسازهای الیافی

طرح اولیه هر جداساز (با چشم پوشی از نوع آن) می‌تواند مبتنی بر مشخصات مکانیکی (شامل سختی‌های قائم و افقی) به دست آمده از روابط نظری انجام پذیرد. با این حال، روابط نظری موجود اطلاعات قابل استنادی در خصوص ماهیت و چگونگی حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی جانبی جداساز، به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخصه‌ها در ارزیابی رفتار جانبی آن، به دست نمی‌دهند. بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی (مانند [۱۵]) الزام می‌دارند که حلقه‌های پسماند یاد شده فقط از طریق انجام آزمایشات برش رفت و برگشتی تحت بار قائم ثابت بر روی نمونه‌های ساخته شده جداسازها تعیین شوند. بنابراین طراحی اولیه در پایان تنها منجر به ساخت نمونه‌های اولیه جداسازها شده و طرح نهایی جداساز تنها پس

کارایی بهتر) به ازاء یک تغییر مکان جانبی ثابت است. جابه‌جایی جانبی می‌تواند تا آنجا پیش رود که وجوه جانبی قائم اولیه جداساز تماماً در تماس با تکیه‌گاه‌های بالایی و پایینی آن قرار گیرند (شکل ۲-ج). این حد از جابه‌جایی را اصطلاحاً جابه‌جایی مانند برخورد کامل^{۱۲} می‌نامند [۱۲]. در این حد از جابه‌جایی سختی جانبی جداساز افزایش یافته و رفتار نیرو- تغییر مکان جانبی دچار سخت‌شدگی می‌شود (شکل ۳). این امر پایداری جانبی جداساز را در قبال زلزله‌های شدیدتر از زلزله مبنای طرح (مثلاً زلزله‌های مانند سطح بیشینه محتمل طراحی) تامین می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند چنانچه جداساز الیافی غیرمتصل به درستی طرح شده باشد، قادر به حفظ پایداری جانبی خویش تا جابه‌جایی مانند برخورد کامل و حتی جابه‌جایی‌های فراتر از آن خواهد بود [۱۳].



الف) قبل از بارگذاری

ب) تغییر شکل شبه غلتان تحت اثر نیروهای جانبی



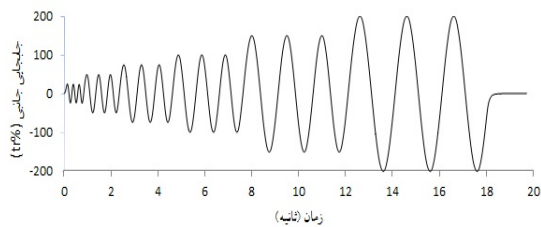
ج) جابه‌جایی نظیر برخورد کامل

شکل (۲) مکانیزم تغییر شکل شبه غلتان در جداسازهای الیافی

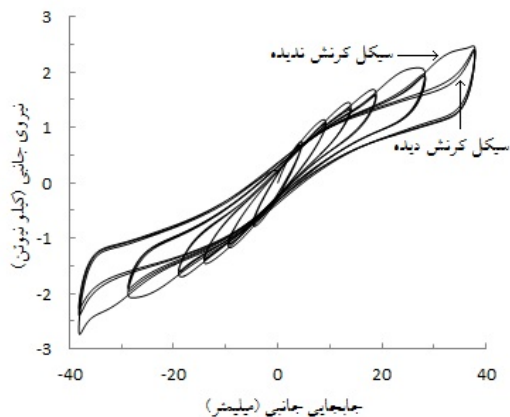
غیرمتصل

یکی دیگر از مزایای جداسازهای الیافی غیر متصل، کاهش قابل توجه تنش‌های کششی وارده بر مرز پیوند میان لایه‌های الاستومر و تسلیح الیافی است. برخلاف جداسازهای متصل، هنگامی که جداساز الیافی غیرمتصل تحت نیروهای برشی دچار تغییر مکان جانبی می‌شود از سوی تکیه‌گاه‌های تماسی در بالا و پایین جداساز هیچ کشش قائمی به جداساز وارد نمی‌شود. بنابراین، یوند بین لایه‌های تسلیح الیافی و لایه‌های الاستومر جداسازی در معرض تنش‌های کششی قائم به مراتب کوچکتری در مقایسه با جداسازهای متصل قرار می‌گیرد. این کاهش تنش موجب کاهش هزینه‌های پیوند لایه‌های درونی به یکدیگر

پسماند نیز حکایت از قابلیت ممتاز جداساز در استهلاک انرژی دارد.



الف) تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های اعمال شده



ب) حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی نیرو- جابه‌جایی جانبی

شکل (۴) آزمایش برش رفت و برگشتی بروی جداسازهای یافی

غیرمتصل [۹]

نکته دیگری که می‌توان در شکل ۴-ب دریافت عدم انطباق حلقه‌های اول با دو حلقه‌ی بعدی مانند هر یک از دامنه‌های جابه‌جایی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در اولین سیکل بارگذاری هر دامنه، جداساز از مقاومت، سختی، و میرایی نسبتاً بیشتری در قیاس با دو سیکل متوالی آن برخوردار است. این خصوصیت که در کلیه مواد الاستومری مشاهده می‌شود، اثر مولینز نامیده می‌شود. هنگامی که یک ماده الاستومری بکر که تاکنون بارگذاری نشده و کرنش ندیده است تحت بارگذاری‌های رفت و برگشتی سیکلی (با دامنه‌های یکسان) قرار می‌گیرد؛ معمولاً در سیکل اول بارگذاری مقاومت، سختی و میرایی بیشتری نسبت به سیکل‌های بعدی از خود نشان می‌دهد. این رفتار که مستقل از نوع تنش یا کرنش رفت و برگشتی وارده می‌باشد غالباً در مواد الاستومری مشاهده می‌شود. پس از چند سیکل محدود اولیه، ماده الاستومری اصطلاحاً

از انجام آزمایش‌های بالا روی نمونه‌های اولیه نهایی می‌شود.

از آنجایی که مواد الاستومری رفتار ویسکوالاستیک داشته و از این رو مشخصات مکانیکی آنها علاوه بر مقدار جابه‌جایی جانبی اعمال شده به سرعت تغییرات جابه‌جایی نیز وابسته است؛ توصیه آیین‌نامه آن است که در آزمایش‌های برش رفت و برگشتی که با هدف به دست آوردن حلقه‌های پسماند انجام می‌گیرند، نرخ جابه‌جایی‌های جانبی وارده در محدوده تواتر (دوره تناوب) طراحی جداسازها باشد [۱۵]. شکل ۴-الف تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های جانبی به کار رفته در آزمایش‌های برش رفت و برگشتی که به وسیله‌ی توپچی نژاد و همکارانش [۱۴] روی نمونه‌های آزمایشگاهی جداسازهای یافی غیر متصل با مقیاس ۱:۴ انجام شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل ملاحظه می‌شود، جابه‌جایی‌های وارد شده با تابع سینوسی در شش دامنه متفاوت ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪، ۰.۷۵٪، ۱.۰۰٪، ۱.۵۰٪، و ۲.۰۰٪ اعمال شده‌اند که t_r مبین ضخامت تمام لایه‌های الاستومری جداساز (در این مورد t_r برابر ۱۹ میلی‌متر) است، ضمناً مانند هر دامنه سه سیکل کامل جابه‌جایی به جداساز اعمال شده است.

شکل ۴-ب حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی به دست آمده را به تصویر می‌کشد. از بررسی حلقه‌های پسماند شکل ۴-ب می‌فهمیم که در منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی جداسازهای یافی غیرمتصل می‌توان نرم‌شدگی تدریجی جداساز که به دلیل کاهش سختی موثر آن در پی تغییر شکل شبه غلطان است را ملاحظه کرد. در مراحل نهایی تغییر شکل جانبی هنگامی که سطوح جانبی قائم اولیه جداساز با تکیه‌گاه‌های بالایی و پایینی برخورد می‌نمایند (همانند شکل ۲-ج) منحنی نیرو- جابه‌جایی به دلیل افزایش سختی موثر جداساز دچار سخت شدگی دوباره می‌شود. ضمناً با توجه به شکل ۴-ب به ازاء تمامی جابه‌جایی‌های وارد شده جداساز پایداری جانبی خود را حفظ کرده است. سطح قابل توجه محصور به حلقه‌های

جداسازهای الیافی غیر متصل

به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی روی سازه جداسازی شده به وسیله‌ی جداسازهای الیافی غیر متصل، لازم است تا حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی جداگرها (شکل ۴-ب) به وسیله یک مدل تحلیلی مناسب شبیه سازی شوند. مدل یاد شده باید نیروی برشی به دست آمده در جداساز را بر حسب مقادیر و نرخ جابه‌جایی‌های وارد بر آن تخمین زده و از سوی دیگر قادر به ملحوظ کردن ویژگی-های خاص حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی جداسازهای مورد نظر باشد. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد حلقه‌های پسماند در جداسازهای الیافی غیر متصل وجود نرم شدگی تدریجی و سپس سخت شدگی دوباره (یعنی وجود یک نقطه عطف) در منحنی نیرو- تغییر مکان جانبی جداساز است (به بزرگترین حلقه پسماند در شکل ۴-ب توجه نمایید). چنین ویژگی را نمی‌توان در سایر جداسازهای الاستومری (اعم از جداسازهای الیافی متصل و یا جداسازهای متعارف تسلیح شده با صفحات فولادی) مشاهده کرد. به همین دلیل لازم است از مدل‌های تحلیلی مناسبی که قادر به لحاظ کردن این اثر در شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند جداسازهای مدنظر باشند استفاده به عمل آورد.

نکته حائز اهمیت دیگر آن است که با توجه به شکل ۴-ب در تخمین بیشینه بازتاب جداساز، نمی‌توان از اثر حلقه‌های پسماند کرنش ندیده چشم‌پوشی کرد، بنابراین لازم است تمهیداتی برای در نظر گرفتن حلقه‌های یاد شده در مدل پیشنهادی اندیشیده شود. در این مقاله از نسخه تعمیم یافته‌ای از مدل تحلیلی بوک-ون^{۱۵} در شبیه‌سازی حلقه‌های پسماند جداسازهای الیافی غیر متصل استفاده به عمل آمده است.

۴-۱- مدل بوک-ون تعمیم یافته

نسخه کلاسیک این مدل نخست به وسیله بوک ارائه [۱۸] و سپس به وسیله‌ی ون تعمیم داده شده است [۱۹]. در این مدل رفتار پسماند مصالح، اعضای سازه‌ای، و یا

کرنش دیده شده و بنابراین مشخصات مکانیکی آن به مقادیر ثابتی می‌رسند [۱۶]. این ویژگی رفتاری اولین بار به وسیله‌ی بواسه^{۱۳} و کاریئر^{۱۴} [۱۷] مشاهده و گزارش شده است، اما تبیین جدی‌تر آن به وسیله‌ی مولینز [۷] انجام و از این رو این خاصیت را به عنوان اثر مولینز نام‌گذاری کرده‌اند.

چرایی اثر مولینز با توجه به خصوصیات ریز مولکولی مواد الاستومری به شرح زیر توجیه می‌شود [۱۶].

الف) گسیختگی پیوندهای بین مولکولی: در بین پیوندهای بین مولکولی ماده الاستومری پیوندهای ضعیف‌تری نیز تشکیل می‌شوند که در سیکل اول (یا چند سیکل محدود اول) بارگذاری بخشی از نیرو صرف شکستن این پیوندها می‌شود. در سیکل‌های بعدی بارگذاری این پیوندهای ضعیف دیگر وجود خارجی نداشته و در نتیجه ماده الاستومری نسبت به سیکل اول بارگذاری رفتار نرم‌تری از خود نشان می‌دهد.

ب) لغزش مولکول‌ها: در بارگذاری اولیه برخی از مولکول‌ها روی یکدیگر لغزش کرده تا در جای مناسب-تری قرار گیرند. در سیکل‌های بعدی همان بارگذاری چنین لغزش‌هایی وجود نداشته و یا بسیار کمتر است، بنابراین ماده الاستومری نرم‌تر می‌شود.

ج) باز شدن گره خوردگی مولکول‌ها: در طول زمان مولکول‌های زنجیروار در مواد شبه الاستومر در یکدیگر گره خورده و درگیر می‌شوند. در بارگذاری اولیه ابتدا مقداری انرژی برای باز کردن این گره‌ها نیاز است که سبب می‌شود ماده الاستومر سیکل اول بارگذاری رفتاری متفاوت‌تر از دیگر سیکل‌ها از خود نشان دهد.

نکته جالب توجه آنکه پس از کرنش دیدن الاستومر در پایان بارگذاری ممکن است برخی از خصوصیات اولیه مانند رفتار کرنش ندیده الاستومر با گذشت زمان بازگشت نمایند.

۴- شبیه‌سازی رفتار نیرو- تغییر مکان جانبی

^{۱۳} Bouasse

^{۱۴} Carrière

شبیه‌سازی کند ولی قادر به شبیه‌سازی رفتار سخت شدگی دوباره و تعریف نقطه عطف تابع نیست. از این رو، برای بیان این رفتار و امکان مدل کردن نقطه عطف منحنی در معادله (۱) از یک چند جمله‌ای درجه ۵ به جای درجه ۳ در این مقاله استفاده می‌شود. علاوه بر این، به دلیل متقارن بودن حلقه‌های پسماند به دست آمده از آزمایش‌های رفت و برگشتی نسبت به مبدا مختصات [۱۴]، چند جمله‌ای درجه ۵ مورد نظر به صورت یک تابع فرد (معادله ۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$F(t) = cx_b + a_1x_b + a_3x_b^3 + a_5x_b^5 + b \left(1 - \frac{\beta}{A}|z|^n\right) \quad (3)$$

از مقایسه معادلات (۱) و (۳) مشاهده می‌شود که تعداد ضرایب ثابت در هر دو معادله، با وجود متفاوت بودن درجه آن‌ها، یکسان است. بنابراین در صورت استفاده از معادله (۳) به جای معادله (۱) هیچگونه پارامتر جدیدی به مسئله تحمیل نمی‌شود.

۲-۴- محاسبه پارامترهای ثابت مدل

پارامترهای ثابت مدل بوک-ون با اتکا به حلقه‌های پسماند نیرو-جابه‌جایی جانبی نمونه جداسازها که در آزمایشگاه به دست آمده‌اند تعیین می‌شوند. برای این منظور لازم است تاریخچه تحریک ورودی به جداساز (یعنی جابه‌جایی‌های x_b) و تاریخچه نیروی برشی به دست آمده در جداساز (F) را از آزمایش‌های رفت و برگشتی انجام شده روی آن بدانیم. با توجه به آنکه در پایان آزمایش تاریخچه x_b و F ثبت می‌شوند، امکان رسم منحنی‌های پسماند آزمایشگاهی فراهم می‌شود. با انطباق ریاضی مدل بوک-ون روی حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی می‌توان ضرایب ثابت مدل را مثلاً به روش کمینه کردن جمع مربع خطاهای حاصل^{۱۶} در تخمین F مانند تک تک داده‌های آزمایش تعیین کرد. باید توجه نمود برخی از ضرایب مدل مقادیر از پیش تعیین شده‌ای دارند (مانند A و n). ضمناً در محاسبه ضرایب a_1 ، a_3 و a_5 قدر مطلق مینیمم سختی به دست آمده از

جداسازهای لرزه‌ای به وسیله معادلات دیفرانسیل غیرخطی و بر حسب تاریخچه جابه‌جایی‌های وارد شده شبیه‌سازی می‌شود. در تعیین ضرایب ثابت مدل بوک-ون از یک رویکرد معکوس استفاده می‌شود؛ به گونه‌ای که با در اختیار داشتن نتایج حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی به عنوان داده‌های ورودی به مدل، پارامترهای ثابت آن طوری محاسبه می‌شوند که در مجموع به بهترین شکل ممکن مدل با داده‌های آزمایشگاهی منطبق شود [۲۰].

مدل بوک-ون ارائه شده در این مقاله نسخه تعمیم یافته مدلی است که ابتدا به وسیله [۲۱] در تحلیل تاریخچه زمانی جداسازهای الاستومری مسلح به صفحات فولادی به کار رفته و معادلات آن به صورت زیر ارائه شده است:

(۱)

$$F(t) = cx_b + a_1x_b + a_2x_b^2 + a_3x_b^3 + b \left(1 - \frac{\beta}{A}|z|^n\right) z$$

(۲)

$$Y\dot{z}(t) = Ax_b - \beta\dot{x}_b |z|^n - \gamma|\dot{x}_b|z|z|^{n-1}$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای محاسبه نیروی برشی وارد شده بر جداساز، $F(t)$ در هر لحظه زمانی باید از معادلات درگیر (۱) و (۲) بطور هم‌زمان استفاده کرد. در این معادلات از دو متغیر وابسته به زمان x_b و Z استفاده به عمل می‌آید. متغیر x_b مبین جابه‌جایی جانبی وارد شده بر جداساز بوده و متغیر دوم، z ، برای مدل کردن رفتار پسماند جداساز استفاده می‌شود. سایر پارامترهای به کار گرفته شده در معادلات (۱) و (۲) ضرایب ثابتی است که مقادیر آن‌ها از انطباق ریاضی مدل با حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی جداسازها به دست می‌آیند.

در معادلات (۱) و (۲) پارامتر c ضریب میرایی و a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب سختی جداساز بوده و A ، β ، γ ، Y و n ضرایب ثابتی هستند که کنترل کننده شکل و اندازه حلقه‌های پسماند است. ضریب A همواره عددی مثبت در نظر گرفته می‌شود [۲۲].

چند جمله‌ای درجه سوم به کار رفته در معادله (۱) می‌تواند رفتار نرم‌شدگی تدریجی جداساز (یعنی کاهش سختی موثر جانبی با افزایش جابه‌جایی‌های وارد شده همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است) را به خوبی

دومين دسته از ضرايب پس از انطباق مدل با داده‌هاي آزمائشگاهي مربوط به سيکل‌هاي دوم و سوم حلقه‌هاي پسماند مانند هر دامنه جابه‌جايي (داده‌هاي آزمائشگاهي مانند رفتار کرنش ديده الاستومر) به دست مي‌آيند. مقادير اين ضرايب نيز در جدول شماره ۱ مندرج است. لازم به ذکر است که در محاسبه ضرايب ياد شده واحدهاي در نظر گرفته شده براي نيروي برشي و جابه‌جايي‌هاي وارد شده به ترتيب نيوتن و متر است.

جدول ۱. مقادير ضرايب بوک-ون نظير اولين سيکل بارگذاري در هر دامنه جابه‌جايي (دسته اول) و ضرايب مانند سيکل‌هاي دوم و سوم در هر دامنه (دسته دوم)

ضرايب	ضرايب دسته اول (نظير وضعيت کرنش نديده الاستومر)	ضرايب دسته دوم (نظير وضعيت کرنش ديده الاستومر)
A	۱/۰	۱/۰
n	۱/۰	۱/۰
c	-۷۷/۳۱۴۹	-۲/۲۱۴۷
a_1	۹۱۷۳۱/۳۱۱۴	۹۰۸۸۰/۸۷۴۱
a_3	-۸۳۱۱۸۰۰۰	-۹۳۲۷۲۸۰۰
a_5	۴۶۴۱۹۵۵۸۲۴۴	۵۰۵۵۰۷۱۸۶۱۰
b	۲۹۲/۰۷۸۰	۸۶/۰۵۰۷
β	۰/۰۶۵۱	-۰/۲۳۲۲
γ	۰/۶۲۲۳	۰/۶۶۵۸
γ	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۱

پس از محاسبه دو دسته ضرايب ياد شده بالا، به منظور کاربرد مدل در شبيه‌سازي حلقه‌هاي پسماند نيرو-جابه‌جايي لازم است تاريخچه جابه‌جايي‌هاي وارده به عنوان ورودی به مدل تعيين شده باشد. با در اختيار داشتن تاريخچه زماني جابه‌جايي‌هاي وارد بر جداساز و با انتخاب گام زماني مناسب، نيروي برشي نظير هر جابه‌جايي به وسيله‌ی مدل بوک-ون (معادلات ۲ و ۳) محاسبه مي‌شود تا در نهايت حلقه‌هاي پسماند شبيه‌سازي شده قابل ترسيم باشند. جزئيات روش به کار رفته در اين مقاله در به کارگيري مدل به صورت زير است:

محاسبات با در نظر گرفتن ضرايب دسته اول، که مانند وضعيت بوک (کرنش نديده) الاستومر هستند آغاز مي‌شود.

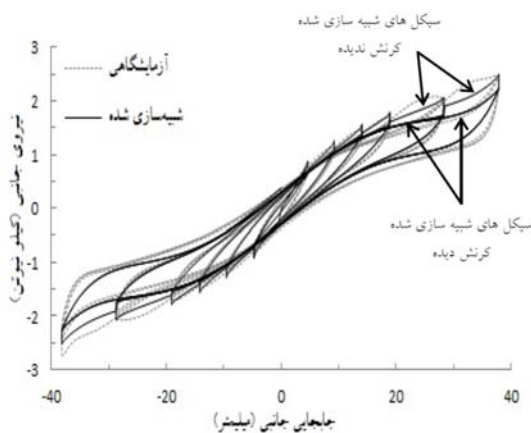
مطالعات آزمائشگاهي روی جداسازها به عنوان یک قيد اعمال شده است تا اطمینان حاصل شود که سختی جداسازها کمتر از انتظار نمی‌شود. مقادير ساير ضرايب مدل بدون هيچگونه قيدي محاسبه مي‌شود.

چنانچه مدل بوک-ون ارائه شده به کليه حلقه‌هاي پسماند آزمائشگاهي- اعم از حلقه‌هاي مانند وضعيت کرنش نديده الاستومر، (سيکل اول بارگذاري در هر دامنه) و وضعيت کرنش ديده الاستومر، (سيکل‌هاي دوم و سوم بارگذاري در هر دامنه) - جداساز اليافي منطبق شود ضرايب ثابت آن مقاديري را خواهند يافت که به ازاء آن مقادير در حلقه‌هاي شبيه‌سازي شده تفکيکی بين رفتار کرنش نديده و رفتار کرنش ديده الاستومر قابل مشاهده نخواهد بود. بنابراین در اين شرايط مدل قادر به تشخيص اثر مولينز نيست. حلقه-هاي شبيه‌سازي شده به وسيله‌ی مدل در اين حالت در مجموع انطباق بهتري با حلقه‌هاي مانند وضعيت کرنش ديده الاستومر، (سيکل‌هاي دوم و سوم هر دامنه) خواهند داشت که اين امر با توجه به فراواني بيشتتر حلقه‌هاي کرنش ديده در نتايج آزمائشگاهي چندان دور از انتظار نيست. با توجه به اين مهم، لازم است در تعيين ضرايب ثابت مدل حلقه‌هاي مانند وضعيت کرنش نديده الاستومر از ساير حلقه‌ها تفکيک شده و بر اساس جزئيات مطرح در بخش بعدي اين مقاله مدل بوک-ون به کار گرفته شود تا امکان شبيه‌سازي اثر مولينز در رفتار جاني جداساز بوجود آيد.

۴-۳- شبيه‌سازي اثر مولينز در حلقه‌هاي پسماند

برای شبيه‌سازي اثر مولينز در جداسازهاي مورد نظر به کمک مدل تحليلی بوک-ون ارائه شده در اين مقاله، دو دسته مقادير برای ضرايب ثابت مدل محاسبه شده‌اند. دسته اول ضرايب از انطباق مدل با حلقه‌هاي پسماند مانند سيکل اول جابه‌جايي‌هاي وارد شده با دامنه‌هاي مختلف محاسبه مي‌شوند. قابل ذکر آن‌که سيکل‌هاي اول حلقه‌هاي پسماند مانند هر دامنه جابه‌جايي مابين رفتار کرنش نديده الاستومر است؛ مقادير محاسبه شده اين ضرايب- در خصوص جداساز اليافي غيرمتصل مورد بررسی- در جدول شماره ۱ قابل مشاهده است.

مناسبی برای آن در شروع محاسبات است. با توجه به توصیه‌های موجود در ادبیات پژوهش [۲۲] مقدار اولیه در نظر گرفته شده برای Z در آغاز محاسبات برابر عدد صفر می‌باشد. بدیهی است در ادامه محاسبات به ازاء هر جابه‌جایی محاسبه شده در زمان i از مقدار Z سازگار محاسبه شده در زمان $i-1$ به عنوان مقدار اولیه Z استفاده به عمل می‌آید. شکل ۵ حلقه‌های پسماند شبیه‌سازی شده توسط مدل بوک-ون ارائه شده در این مقاله را با حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی [۱۴] مقایسه می‌نماید.



شکل (۵) حلقه‌های پسماند شبیه‌سازی شده منطبق بر حلقه‌های پسماند آزمایشگاهی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل بوک-ون تعمیم یافته مورد استفاده تا جابه‌جایی‌های با دامنه ۲۰ میلی‌متر از انطباق بسیار مناسبی با حلقه‌های آزمایشگاهی برخوردار بوده و به خوبی قادر به تعقیب حلقه‌های مانند حالت کرنش ندیده و کرنش دیده الاستومر است. در سایر حلقه‌های پسماند اگر چه مدل قادر به تشخیص و تا حدی تعقیب حلقه‌های کرنش ندیده است، لیکن دقت آن به خوبی حلقه‌های کوچکتر نیست. با این حال، با توجه به قابلیت خوب مدل در تخمین مناسب نقاط انتهایی (مانند بیشینه و کمینه مقادیر نیروی برشی) در کلیه حلقه‌های پسماند، به نظر می‌رسد مدل ارائه شده در پیش بینی مقادیر بیشینه بازتاب در یک تحلیل دینامیکی از دقت مناسبی برخوردار باشد.

در طول انجام محاسبات مقادیر بیشینه و کمینه جابه‌جایی‌هایی که به وسیله‌ی جداگر تا آن لحظه زمانی خاص (زمان t_i) تجربه شده اند ذخیره می‌شود؛ این مقادیر را $x_{b,max}$ و $x_{b,min}$ می‌نامیم (توجه: مقدار کمینه جابه‌جایی می‌تواند یک عدد منفی باشد). در انجام محاسبات گام زمانی $i+1$ ابتدا لازم است مقدار جابه‌جایی وارد شده در لحظه زمانی t_{i+1} با مقادیر $x_{b,max}$ و $x_{b,min}$ مقایسه شود. چنانچه جابه‌جایی یاد شده (یعنی $x_{b,i+1}$) درون فاصله [$x_{b,max}$ و $x_{b,min}$] قرار گیرد بدان معناست که جداساز پیش‌تر (تا لحظه زمانی مورد نظر) جابه‌جایی‌هایی با دامنه بزرگتر را تجربه کرده و لایه‌های الاستومری آن کرنش دیده‌اند. در این شرایط از ضرایب دسته دوم، مانند وضعیت کرنش دیده الاستومر، در مدل بوک-ون استفاده می‌شود. چنانچه x_{i+1} خارج فاصله [$x_{b,max}$ و $x_{b,min}$] باشد، استنباط آن خواهد بود که دامنه جابه‌جایی $x_{b,i+1}$ فراتر از بیشترین حد مثبت یا منفی است که تا آن لحظه به وسیله‌ی مواد الاستومری جداساز تجربه شده است. بنابراین رفتار الاستومر کرنش ندیده تلقی شده و به همین دلیل در انجام محاسبات آن گام زمانی از ضرایب دسته اول استفاده به عمل آید.

نکته مهم در استفاده از مدل بوک-ون طبق جزئیات یاد شده در پاراگراف فوق حفظ پیوستگی مدل در لحظات زمانی است که ضرایب تغییر می‌نمایند. از بررسی دقیق مدل، دریافت می‌شود که این پیوستگی به چگونگی استفاده از پارامتر Z بستگی دارد. برای آن که این پیوستگی رعایت شود، باید برای هر جابه‌جایی محاسبه شده $x_{b,i}$ چشم‌پوشی از آنکه کدام دسته از ضرایب در محاسبه $x_{b,i}$ بکار رفته‌اند، مقادیر $Z_{i,1}$ و $Z_{i,2}$ به ترتیب، نظیر ضرایب دسته اول و دوم محاسبه شده و ذخیره شود. در هر لحظه زمانی که ضرایب مورد استفاده به وسیله‌ی مدل - بین ضرایب دسته اول و دوم - تغییر می‌کند، باید از یک Z سازگار که متناظر با دسته تغییر یافته ضرایب است، در ادامه محاسبات استفاده شود.

در محاسبه مقادیر Z همواره نیاز به کاربرد مقدار اولیه

الیافی می‌شود. این امر باردیگر تاییدی بر اهمیت پژوهش انجام شده در این مقاله است. با توجه به مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده مدل یاد شده در جدول ۲، مدل ارائه شده از دقت مناسبی در پیش بینی مشخصات مکانیکی جداساز مورد بررسی برخوردار است.

جدول ۲. مقایسه مشخصات مکانیکی جداساز الیافی غیرمتصل موردنظر (مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل بوک-ون پیشنهادی)

دامنه جابجایی جانبی (mm)	مطالعات آزمایشگاهی [۱۴]		مدل بوک - ون توسعه یافته پیشنهادی	
	نسبت استهلاک بحرانی معادل (N/mm) (%)	نسبت استهلاک بحرانی معادل (%)	نسبت استهلاک بحرانی معادل (N/mm) (%)	نسبت استهلاک بحرانی معادل (%)
۴/۷۵	۱۶۴/۰	۱۳/۷	۱۷۸/۸	۱۲/۵
	۱۵۵/۶	۱۳/۴	۱۶۵/۲	۱۱/۷
	۱۵۴/۱	۱۳/۳	۱۶۵/۲	۱۱/۹
۹/۵	۱۲۳/۳	۱۱/۹	۱۳۴/۲	۱۲/۱
	۱۱۶/۵	۱۰/۹	۱۲۰/۸	۱۱/۰
	۱۱۴/۶	۱۰/۸	۱۲۰/۸	۱۰/۹
۱۴/۲۵	۱۰۳/۳	۱۰/۲	۱۰۹/۶	۱۰/۷
	۹۷/۱	۹/۵	۱۰۲/۳	۹/۸
	۹۵/۳	۹/۴	۱۰۲/۱	۹/۹
۱۹	۸۹/۳	۹/۴	۹۴/۱	۹/۳
	۸۴/۷	۸/۸	۸۸/۲	۹/۰
	۸۳/۶	۸/۷	۸۸/۳	۸/۹
۲۸/۵	۷۲/۹	۹/۹	۷۲/۷	۹/۳
	۶۸/۸	۸/۴	۶۶/۹	۸/۰
	۶۷/۱	۸/۳	۶۶/۸	۸/۰
۳۸	۶۸/۵	۹/۴	۶۶/۱	۸/۸
	۶۳/۳	۸/۳	۶۲/۶	۷/۹
	۶۱/۶	۸/۱	۶۲/۲	۷/۸

۵- شبیه سازی رفتار لوزه ای

در ادامه عملکرد مدل بوک-ون پیشنهادی در تخمین رفتار

جدول ۲ مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده سختی موثر (سختی سکانت) و همچنین نسبت استهلاک بحرانی معادل در هر یک از سه حلقه پسماند مانند دامنه‌های مختلف جابه‌جایی را در جداساز مورد نظر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر یاد شده را می‌توان از روابط ارائه شده در سطور زیر در هر حلقه پسماند محاسبه کرد [۱۵].

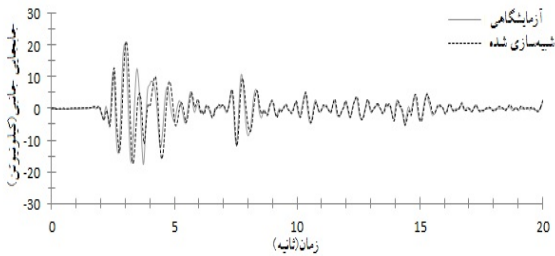
$$K = \frac{F_{max} - F_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۴)$$

$$\xi = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad (۵)$$

$$W_s = \frac{1}{2} K_{eff} x_{max}^2 \quad (۶)$$

در روابط فوق K سختی موثر، F_{min} و F_{max} نیروی‌های جانبی بیشینه و کمینه، x_{min} و x_{max} جابه‌جایی‌های بیشینه و کمینه در حلقه‌های پسماند مورد نظر، W_d مبین انرژی مستهلاک شده (سطح محصور به حلقه پسماند) بوده و W_s نشانگر انرژی ذخیره شده در جداساز است که از رابطه (۶) بر حسب بیشینه جابه‌جایی جانبی x_{max} و سختی جانبی موثر K_{eff} (یا همان سختی سکانت مانند x_{max}) محاسبه می‌شود.

براساس جدول ۲ بیشینه خطا در محاسبه سختی موثر ۹/۱ درصد (مانند جابه‌جایی ۴/۲۵ میلی‌متر) و در محاسبه میرایی ۱۲/۷- درصد (مانند جابه‌جایی ۴/۲۵ میلی‌متر) است. با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده تفاوت در سختی موثر و نسبت استهلاک بحرانی معادل بین حلقه‌های کرنش دیده و کرنش ندیده ای که هم دامنه می‌باشند، قابل توجه است. طبق جدول ۲ بیشینه اختلاف در سختی موثر ۸ درصد (مربوط به جابه‌جایی ۱۴/۲۵ میلی‌متر) و بیشینه تفاوت در نسبت استهلاک بحرانی معادل ۱۶ درصد (مربوط به جابه‌جایی ۲۸/۵ میلی‌متر) است. بنابراین، در حالت کلی چشم‌پوشی از اثر مولینز و نادیده گرفتن اختلافات قابل توجه یاد شده در مشخصات مکانیکی مانند وضعیت کرنش ندیده الاستومر در محاسبات باعث کاهش قابل توجه دقت محاسبات در تعیین مقادیر بیشینه بازتاب دینامیکی جداساز

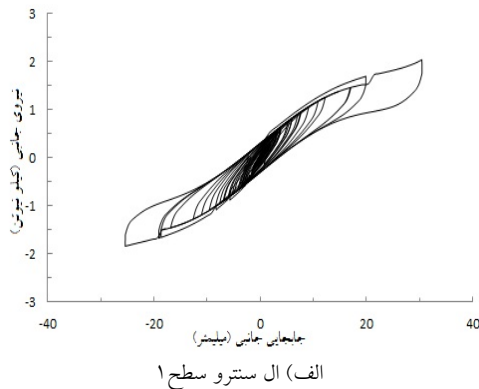


ب) ال سسترو سطح ۲ (PGA=۰/۵۱ g)

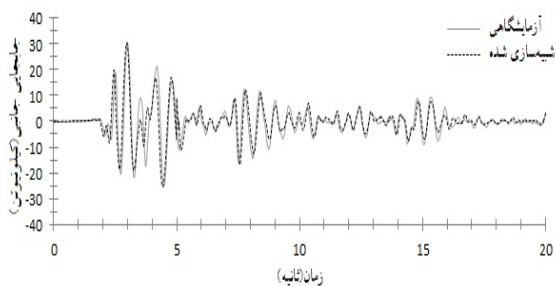
شکل (۶) جابه‌جایی جانبی جداساز شبیه‌سازی شده منطبق بر مقادیر اندازه‌گیری شده در زلزله ال سسترو

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل بوک-ون پیشنهادی در مجموع از انطباق خوبی با نتایج میز لرزه برخوردار است، بیشینه جابه‌جایی جانبی حاصل در جداساز به ازاء زلزله سطح ۱ با خطای ۰/۳- درصد و به ازاء سطح ۲ با خطای ۴/۴ درصد به وسیله‌ی مدل بوک-ون محاسبه شده‌اند؛ که مبین دقت بسیار مطلوب مدل در تخمین مقادیر بیشینه بازتاب دارد.

شکل ۷ حلقه‌های پسماند شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مشابهت شکل کلی حلقه‌های پسماند و همچنین قابلیت شبیه‌سازی اثر مولینز نشان از عملکرد مناسب مدل در تحلیل تاریخچه زمانی لرزه‌ای است.

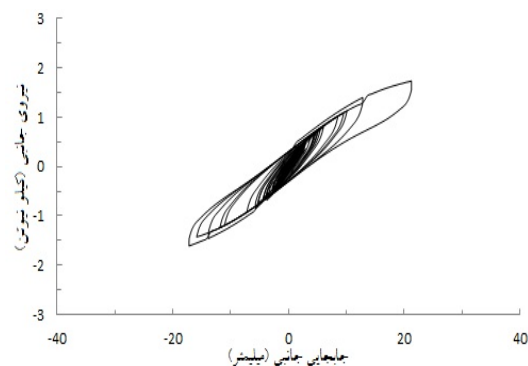


تاریخچه زمانی جداسازهای مورد نظر بررسی می‌شود تا کارایی آن هنگامی که تاریخچه جابه‌جایی‌های وارد شده متفاوت از تاریخچه‌ای که مبنای محاسبه ضرایب ثابت مدل قرار گرفته است (یعنی شکل ۴-الف) ارزیابی شود. در این راستا از مدل بوک-ون پیشنهادی در شبیه‌سازی تاریخچه زمانی بازتاب یک سازه آزمایشگاهی جداسازی شده با جداسازهای الیافی غیرمتصل مورد نظر که از آزمایش‌های میز لرزه به دست آمده، استفاده می‌شود. در آزمایش‌های یاد شده سازه تحت زلزله ال سسترو در ۲ سطح مختلف با PGAهای ۰/۶ g و ۰/۵۱ g قرار گرفته است. مشخصات سازه آزمایش و جزئیات کامل آزمایش‌ها میز لرزه انجام شده روی آن در مرجع [۲۳] قابل مشاهده است. شکل ۶ تاریخچه جابه‌جایی‌های جانبی در جداسازهای سازه آزمایش، منتج از مطالعات آزمایشگاهی و پاسخ شبیه‌سازی شده آن به وسیله‌ی مدل بوک-ون پیشنهادی را نشان می‌دهد. معادلات حاکم بر رفتار سازه جداسازی شده و مشخصات ماتریس‌های جرم، سختی، و میرایی آن در مرجع [6] به تفصیل ارائه شده‌اند. به منظور حل عددی معادلات حاکم بر رفتار سازه و همچنین برای کاربرد مدل بوک-ون پیشنهادی برنامه‌ای در محیط MATLAB تدوین و مورد استفاده قرار گرفته است.



الف) ال سسترو سطح ۱ (PGA=۰/۰۶ g)

- Analysis. *Composite Structures*, 93(2): 850-859.
- [4] Pan TC, Yang G. Nonlinear analysis of base-isolated MDOF structures. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Mexico, 1996, Paper No. 1534.
- [5] Hwang, J.S., Wu, J.D., Pan, T.C., and Yang, G. 2002. A mathematical hysteretic model for elastomeric isolation bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(4): 771-789.
- [6] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2009. Simplified analysis of a low-rise building seismically isolated with stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36: 1182-1194.
- [7] Mullins, L. 1948. Effect of stretching on the properties of rubber. *Journal of Rubber Research*, 16: 275-82.
- [8] Moon, B. Y., Kang, G. J., Kang, B. S., and Kelly, J. M. 2002. Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation. *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131: 145-150.
- [9] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2008. Testing and modeling of square carbon fiber reinforced elastomeric seismic isolators. *Structural Control and Health Monitoring*, 15(6): 876-900.
- [10] Mordini, A., and Strauss, A. 2008. An innovative earthquake isolation system using fibre reinforced rubber bearings. *Engineering Structures*, 30: 2739-2751.
- [11] Dehghani Ashkezari, G., Aghakouchak, A.A., Kokabi, M. 2008. Design, manufacturing and evaluation of the performance of steel like fiber reinforced elastomeric seismic isolators. *Journal of Materials Processing Technology*. 197(1-3): 140-150.
- [12] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2008. Parametric study on the response of stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators (SU-FREIs). *Journal of Composite Materials*, 43(15): 1569-1587.
- [13] De Raaf M.G.P., Tait M.J., and Toopchi-Nezhad, H., 2011. Stability of fiber-reinforced elastomeric bearings in an unbonded application. *Journal of Composite Materials*, 45(18): 1873-1884.
- [14] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2008. Lateral response evaluation of fiber reinforced neoprene seismic isolators utilized in an unbonded application. *Journal of Structural Engineering*, 134(10): 1627-1638.
- [15] ASCE/SEI 7. 2010. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- [16] Diani, J., Fayolle, B., and Gilormini, P. 2009. A review on the Mullins effect. *European Polymer Journal*, 45: 601-612.
- [17] Bouasse, H, Carrière, Z. 1903. Courbes de traction du caoutchouc vulcanisé. *Ann Fac Sci Toulouse*, 5: 257-83.



ب) ال سترو سطح ۲

شکل (۷) حلقه‌های پسماند شبه‌سازی شده

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن معرفی اجمالی جداسازهای الاستومری مسلح به الیاف (جداسازهای الیافی)، مزیت‌های اقتصادی و فنی جداسازهای الیافی غیرمتصل مورد بررسی قرار داده شدند. مهم‌ترین مشخصه در رفتار جانبی جداسازهای یاد شده عبارتند از: الف- رابطه غیرخطی نیروی سختی و جابه‌جایی‌های جانبی جداساز که به دلیل تغییر شکل جانبی شبه غلطان جداساز ایجاد می‌شود و ب- متفاوت بودن مشخصات مکانیکی جداساز در سیکل اول بارگذاری که به دلیل اثر مولینز در لایه‌های الاستومر جداساز ایجاد می‌شود. هدف اصلی این مقاله شبه‌سازی حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی جانبی در جداسازهای الیافی غیرمتصل با لحاظ کردن مشخصات رفتاری یاد شده بالا بود. از این رو نسخه تعمیم یافته‌ای از مدل بوک- ون برای شبه‌سازی رفتار جانبی جداسازهای مورد نظر ارائه شد. مقایسه نتایج مدل با داده‌های آزمایشگاهی مبین دقت مناسب آن در تقریب حلقه‌های پسماند نیرو- جابه‌جایی و همچنین رفتار تاریخیچه زمانی جداسازهای الاستومری مورد نظر است.

۷- مراجع

- [1] Kelly, J.M. 1999. Analysis of fiber-reinforced elastomeric isolators. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 2(1): 19-34.
- [2] Kelly, J.M. 2002. Seismic isolation systems for developing countries. *Earthquake Spectra*, 18(3): 385-406.
- [3] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2011. Bonded versus Unbonded Strip Fiber Reinforced Elastomeric Isolators: Finite Element

- [18] Bouc, R. 1967. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis. In: Proceedings of fourth conference on non-linear oscillation, Prague, Czechoslovakia 21, 16–25.
- [19] Wen, Y.K. 1976. Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 102(2): 249–263.
- [20] Ikhouane, F. ,and Rodellar, J. 2007. Systems with Hysteresis Analysis, Identification and Control using the Bouc-Wen Model. John Welly & Sons, Ltd.
- [21] Chen, Y., and Ahmadi, G. 1992. Wind effects on base-isolated structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 118: 1708–27.
- [22] Sireteanu, T., Giuclea, M. and Mitu, A.M. 2010. Identification of an extended Bouc–Wen model with application to seismic protection through hysteretic devices. *Journal of Engineering Mechanics*, 45: 431–441.
- [23] Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J., and Drysdale, R.G. 2008. Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs (stable unbonded fiber reinforced elastomeric isolators). *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 38(11): 1335–1357.

